

Лабораторная работа №4 ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Цель работы - освоение метода оптической пирометрии; изучение устройства и принципа действия яркостного пирометра, определение систематической погрешности при его использовании для контроля температуры.

Оптическая пирометрия - метод дистанционного контроля температуры нагретых (самосветящихся) тел по их тепловому излучению в видимой части спектра. Пирометры используются, в основном, для измерения температуры тел от 300 °С до 6000 °С и выше, хотя теоретически верхний предел метода неограничен.

Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии. Таким образом, все тела при температуре выше абсолютного нуля являются источниками теплового излучения.

Контроль температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для *черного тела*. Черным телом называется тело, которое при данной температуре имеет наибольшую по сравнению с другими телами энергию излучения. Черное тело полностью поглощает любое электромагнитное излучение, падающее на его поверхность, т.е. его коэффициент поглощения $\alpha_e = 1$.

Зависимость энергетической светимости M_e^o черного тела от абсолютной температуры T выражается законом Стефана-Больцмана

$$M_e^o = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}^o d\lambda = \sigma T^4, \quad (4.1)$$

где λ – длина волны, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана, $M_{e,\lambda}^o$ – спектральная плотность энергетической светимости черного тела, которая в свою очередь подчиняется закону Планка:

$$M_{e,\lambda}^o = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp \left\{ \frac{c_2}{\lambda T} \right\} - 1 \right]}, \quad (4.2)$$

где $c_1 = 3,742 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², $c_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Длина волны λ_m , при которой функция $M_{e,\lambda}^o$ имеет максимум, связана с температурой черного тела законом Вина

$$\lambda_m T = b, \quad (4.3)$$

где $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ м·К. Значение спектральной плотности энергетической светимости при $\lambda = \lambda_m$ зависит от температуры по закону

$$(M_{e,\lambda}^o)_{\max} = AT^5, \quad (4.4)$$

где $A = 1,301 \cdot 10^{-15}$ Вт/(м³·К⁵).

Реальные тела не являются черными и лишь некоторые из них по оптическим свойствам близки к ним, например, нефтяная сажа, платиновая чернь, черный бархат в области видимого света имеют коэффициенты поглощения, мало отличающиеся от единицы. Классическим примером черного тела служит поверхность Солнца.

Энергетическая светимость *серого* тела M_e не зависит от длины волны и всегда меньше M_e^o . Излучательную способность серого теплового излучателя характеризует коэффициент излучения $\varepsilon = M_e / M_e^o$. Если тело излучает *селективно*, т.е. его энергетическая светимость различна при разных длинах волн излучения, то следует пользоваться спектральным коэффициентом излучения

$$\varepsilon_\lambda = M_{e,\lambda} / M_{e,\lambda}^o. \quad (4.5)$$

Значения ε и ε_λ определяются экспериментально. В частности, спектральные коэффициенты излучения ряда веществ для рабочей длины волны пирометра ОППИР-017 приведены в [11].

Из формулы (4.4) следует, что даже небольшие изменения температуры тела приводят к значительным изменениям его спектральной

плотности энергетической светимости. С другой стороны человеческий глаз способен различить разницу яркостей объекта и фона с точностью до нескольких процентов (см. л.р. № 1). Эти факты устанавливают возможность измерения температуры тела по его спектральной светимости с высокой чувствительностью.

При контроле температуры *яркостными визуальными пирометрами*, к которым относится и пирометр ОППИР-017, изучаемый в настоящей работе, основной оцениваемой глазом величиной является спектральная яркость излучателя L_λ (в фотоэлектрических яркостных пирометрах оценивается энергетическая спектральная яркость $L_{e,\lambda}$). Для равноярких во всех направлениях излучателей эта величина связана с их спектральной плотностью энергетической светимости соотношением

$$L_\lambda = K_m K_\lambda M_{e,\lambda} / \pi, \quad (4.6)$$

где $K_m = 683$ лм/Вт, K_λ - относительная спектральная световая эффективность. Значения K_λ для *среднего глаза* табулированы и утверждены национальными и международными стандартами.

Для реальных (равноярких) тел из формул (4.2), (4.5) и (4.6) получим следующее выражение для спектральной яркости

$$L_\lambda = \frac{c_1 K_m K_\lambda \varepsilon_\lambda}{\pi \lambda^5 \left[\exp \left\{ \frac{c_2}{\lambda T} \right\} - 1 \right]}. \quad (4.7)$$

Из соотношения (4.7) следует, что, если реальные тела имеют одну и ту же температуру, то из-за различия в значениях ε_λ измеренные значения L_λ будут различаться. Это не позволяет иметь единую шкалу прибора для разных объектов контроля (ОК). Поэтому шкалу яркостного пирометра градуируют по излучению черного тела, однако, при этом показания пирометра будут соответствовать не действительной, а *яркостной температуре* ОК.

Яркостной температурой T_y называется физическая величина, равная температуре черного тела, при которой для данной длины волны оно имеет такую же спектральную энергетическую яркость, что и рас-

смаатриваемый излучатель. Используя приведенное определение и формулу (4.7), для определения T_y получим уравнение

$$\left[\exp\left\{\frac{c_2}{\lambda T_y}\right\} - 1 \right] = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left[\exp\left\{\frac{c_2}{\lambda T}\right\} - 1 \right]. \quad (4.8)$$

Так как рабочие длины волн яркостных пирометров составляют $0,5 \div 1,5$ мкм, а измеряемые температуры лежат в интервале от 600 К до 6000 К, то отношение $c_2/\lambda T$ всегда больше 10. Учитывая это и $\lambda T_y \sim \lambda T$ из (4.8) получим

$$T_y = \frac{T}{1 + BT}, \quad (4.9)$$

где $B = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}$. Из соотношения (4.9) следует, что $T_y < T$, причем разность $T_y - T$ может достигать нескольких сотен кельвинов.

Кроме яркостных пирометров, принцип действия которых рассмотрен выше, в оптической пирометрии применяют *цветовые пирометры* (пирометры спектрального отношения), которые измеряют температуру по значению отношения энергетических яркостей ОК в двух спектральных интервалах, и *радиационные пирометры* (пирометры полного излучения), измеряющие температуру ОК по его энергетической светимости [12].

К числу яркостных пирометров (пирометров частичного излучения) квазимонохроматического типа принадлежит оптический пирометр ОППИР-017 со встроенным показывающим прибором и исчезающей нитью переменного накала, который используется в данной работе.

Оптический пирометр ОППИР-017 позволяет измерять температуру тел, нагретых выше температуры начала видимого свечения, по их спектральной яркости в узком диапазоне длин волн. Оценка температуры производится по значению эталонной яркости нити электрической лампы пирометра. Нить пирометра предварительно приводится в фотометрическое равновесие с телом, температура которого измеряется. Шкала прибора проградуирована в градусах Цельсия яркостной температуры

накаленного тела и имеет следующие пределы измерений: первый – 800 – 1200 °С, второй – 1200 – 1400 °С.

В состав ОППИР-017 входят такие основные блоки:

1) оптическая система, состоящая из объектива, окуляра, диафрагмы, поглощающих стекол и монохроматического (красного) светофильтра, позволяющего рассматривать в лучах определенного цвета нить лампы на фоне изображения раскаленного тела;

2) пирометрическая лампа, включенная в электрическую схему последовательно с аккумулятором и реостатом для регулирования тока накала нити лампы, служащей эталоном измеряемой яркостной температуры;

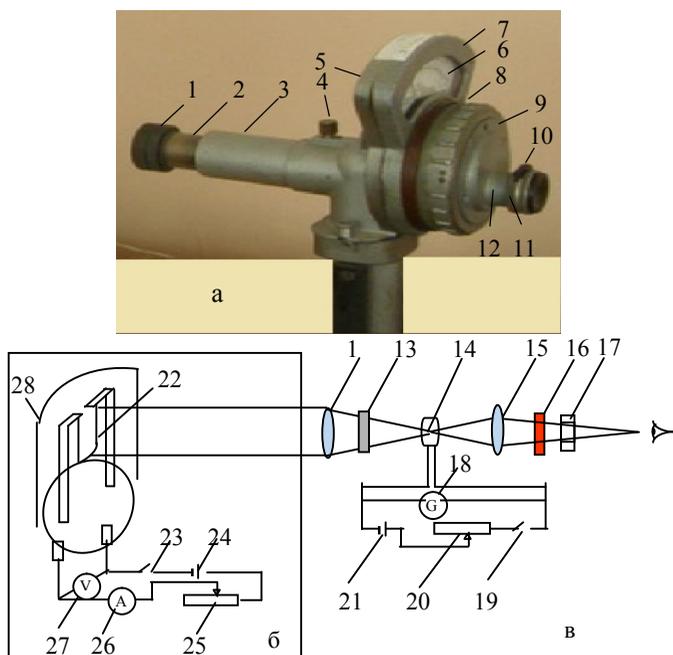


Рис. 4.1. Схема пирометра ОППИР-017. а – внешний вид; б – лабораторная установка; в – электрическая и оптическая скелетные схемы пирометра
 1 – линза объектива; 2 – тубус объектива; 3 – труба объектива; 4 – поворотная рукоятка поглощающих стекол; 5 – корпус; 6 – шкала показывающего прибора; 7 – крышка корпуса; 8 – поворотное кольцо (движок) реостата; 9 – направляющая труба тубуса окуляра; 10 – выдвижной тубус окуляра; 11 – поворотная обойма красного светофильтра; 12 – крышка реостата; 13 – поглощающее стекло; 14 – пирометрическая лампа; 15 – линза окуляра; 16 – светофильтр; 17 – выходная диафрагма окуляра; 18 – показывающий прибор; 19 – выключатель; 20 – кольцевой реостат; 21 – источник питания пирометра; 22 – лента лампы накаливания; 23 – рубильник лабораторной установки; 24 – источник питания лампы накаливания 25 – реостат; 26 – амперметр; 27 – вольтметр; 28 – стеклянный колпак лампы накаливания

3) электроизмерительный прибор, представляющий собой дифференциальный амперметр магнитоэлектрической системы с двумя рамками, из

которых основная включена параллельно лампе, а дополнительная – навстречу основной и последовательно с лампой. Применение этой схемы позволяет уменьшить нерабочий участок шкалы до минимальной величины.

Конструктивно пирометр ОППИР-017 включает следующие основные узлы (рис. 4.1а, в). Корпус 5, в котором смонтированы труба 3 объектива, внутри которой может скользить выдвижной тубус 2 с укрепленной в нем линзой 1 объектива, служащей для создания изображения накаливаемого тела в плоскости нити пирометрической лампы 14. На внешней стороне тубуса накручена гайка с накаткой, за которую берется рукой при перемещении объектива. Перемещение тубуса объектива на 28 мм обеспечивает получение четкого изображения предмета, находящегося на расстоянии от объектива от 0,7 м до бесконечности.

При измерении температур свыше 1200 °С в поле зрения между линзой 1 объектива и лампой поворотом рукоятки 4 вводится одно из поглощающих (дымчатых) стекол; при этом белая указательная точка на рукоятке 4 совпадает с одной из цветных (красной или голубой) точек на корпусе 5, указывающей, на каком пределе нужно производить отсчет температуры.

Шкала 6 показывающего прибора имеет два предела измерений, указанные выше. Первый (нижний) предел измерений обозначен на шкале голубой точкой, а второй (верхний) предел – красной точкой. Когда белая указательная точка на рукоятке 4 совпадает с голубой точкой на корпусе 5, то отсчет следует производить на нижнем пределе измерений, в случае ее совпадения с красной точкой отсчет производится на верхнем пределе измерений.

В крышке 7 корпуса смонтирован кольцевой реостат для регулирования тока накала пирометрической лампы 14. При повороте кольца 8 слева направо по направлению стрелки, нанесенной на кольцо, сопротивление реостата, введенное в цепь накала пирометрической лампы, уменьшается. При повороте кольца 8 влево до упора, ограничивающего вращение кольца, цепь накала лампы разрывается.

Окулярная система служит для рассматривания в монохроматиче-

ских лучах нити пирометрической лампы 14 на фоне изображения накаливаемого тела, температура которого измеряется. Окулярная система смонтирована в выдвижном тубусе 10 окуляра, перемещаемом в направляющей трубе 9, выполненной как одно целое с крышкой 12 реостата. В тубусе окуляра установлены линза окуляра, монохроматический (красный) светофильтр, укрепленный в поворотной обойме 11, и входная диафрагма, за которой находится глаз наблюдателя при измерении температуры.

В наружный конец тубуса 10 ввернуто основание окуляра с накаленной наружной частью, с помощью которой перемещают окулярную систему при наводке на резкость. Выдвижение тубуса окулярной системы обеспечивает четкую видимость нити пирометрической лампы для любого глаза, характеризуемого значением от +13 до - 6 диоптрий.

Электроизмерительный показывающий прибор, встроенный в пирометр, реагирует на изменение напряжения и тока пирометрической лампы 14, изменяющихся в зависимости от сопротивления нити лампы, а, следовательно, и от ее температуры. Электроизмерительный прибор и реостат смонтированы в крышке корпуса.

Электрическая схема питания пирометра, за исключением источника питания 21, смонтирована в корпус пирометра.

Методика выполнения работы

Лабораторная установка, предназначенная для изучения работы пирометра и определения его систематической погрешности (рис. 4.1б), состоит из нагреваемого тела – нихромовой ленты 22, укрепленной на токопроводящих стержнях (ленточной лампы накаливания с колпаком 28), рубильника 23, источника питания лампы накаливания 24, реостата 25, амперметра 26 и вольтметра 27.

В качестве теплового излучателя в данной работе используется нихромовая лента, нагреваемая электрическим током. Если измерение температуры производить в центральной области ленты, то такой источник света можно считать равнорядным.

Мощность тока $P = IU$, затрачиваемая на поддержание нихромовой

ленты в накаливаемом состоянии при данной температуре T , компенсирует излучаемую мощность. Однако не вся электрическая мощность P идет на излучение, так как часть ее отводится в виде тепла вследствие теплопроводности токопроводящих проводов в среду, окружающую накаливаемое тело. Соответствующие оценки показывают, что потери на теплопроводность в используемой лампе накаливания составляют примерно 8 %.

Используя закон Стефана-Больцмана (4.1) и приравнявая электрическую мощность kIU ($k = 0,92$ – коэффициент, учитывающий потери на теплопроводность) мощности излучения нихромовой ленты с площадью поверхности S и коэффициентом излучения ε , получим

$$kIU = \sigma\varepsilon S(T^4 - T_0^4), \quad (4.10)$$

где T - температура ленты, T_0 - температура среды, окружающей излучатель, а площадь ленты определяется равенством

$$S = 2(a + b)l, \quad (4.11)$$

где a - ширина ленты, b - ее толщина, l - длина накаливаемой части ленты, т.е. расстояние между зажимами, в которых она укреплена.

Спектральный состав излучения некоторых металлов и сплавов, в т.ч. нихрома, никеля и др., покрытых окислами, при нагревании их на воздухе близок к излучению абсолютно черного тела. Их коэффициент излучения одинаков для всех длин волн и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела. Из таблицы, приведенной в [12], найдем, что для окисленного нихрома $\varepsilon = \varepsilon_\lambda = 0,9$.

Уравнение (4.10) приводит к следующему выражению для температуры ленты:

$$T = \sqrt[4]{\frac{kIU}{\sigma\varepsilon S} + T_0^4}. \quad (4.12)$$

Следовательно, измеряя величину тока I амперметром 26, напряжение U - вольтметром 27 и зная площадь поверхности нити S (указана на установке) и температуру окружающей среды T_0 , можно вычислить температуру ленты T , а затем по формуле (4.9) найти соответствующую ей яркостную температуру $T_{я}$.

Проводя одновременно измерения яркостной температуры $T_{\text{я}}^{\text{п}}$ накаливаемого тела с помощью пирометра и сравнивая вычисленную $T_{\text{я}}$ с измеренной $T_{\text{я}}^{\text{п}}$, можно оценить приборную погрешность пирометра:

$$\delta = \frac{|T_{\text{я}} - T_{\text{я}}^{\text{п}}|}{T^{\text{пред}}} \cdot 100\%, \quad (4.13)$$

где $T^{\text{пред}}$ - верхний предел измерения температуры по используемой шкале.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему лабораторной установки согласно рис. 4.1б.
2. Проверить, выключено ли питание пирометра, убедившись, что белая отметка на поворотном кольце 8 реостата стоит против такой же отметки на крышке 7 корпуса. Если этого нет, довести влево до упора кольцо 8. Поворотом кольца 8 реостата по часовой стрелке включить ток в схему пирометра и довести накал нити пирометрической лампы приблизительно до 1400 °С (по показаниям встроенного показывающего прибора). Направить телескоп на какую-нибудь не ярко освещенную поверхность (лучше темную) и, приложив глаз к выходной диафрагме окуляра, медленно перемещать тубус окуляра до тех пор, пока наблюдатель не будет видеть нить пирометрической лампы совершенно четко. Заметим, что плавно перемещать тубус удобнее всего, сообщая ему одновременно поступательное и слегка вращательное движение. При этом красный светофильтр поворотом обоймы 11 может быть выведен из поля зрения или введен в него по усмотрению наблюдателя в зависимости от индивидуальных свойств его зрения.
3. В зависимости от предполагаемого значения измеряемой температуры выбрать верхний предел измерения $T^{\text{пред}}$ поворотом накатанной рукоятки 4 поглощающих стекол. При измерении температур, находящихся в пределе более низких температур, рукоятку 4 поглощающих стекол следует установить так, чтобы белая указательная точка оказалась против голубой точки на корпусе 5. При изме-

рении температур, находящихся в пределе более высоких температур, рукоятку 4 поглощающих стекол следует установить так, чтобы белая указательная точка оказалась против красной точки на корпусе 5.

4. Замкнуть рубильник 23, включить ток и с помощью реостата 25 подобрать рекомендуемое значение силы тока, нагревающего нихромовую ленту. Записать показания амперметра 26 и вольтметра 27, соответствующие этому значению силы тока.
5. Направить телескоп на ленту лампы накаливания, температура которой подлежит измерению и, приложив глаз к выходной диафрагме окуляра, медленно перемещать тубус 2 объектива до тех пор, пока не будет совершенно четко видно изображение ленты (перевернутое) одновременно с нитью пирометрической лампы (рис.4.2).

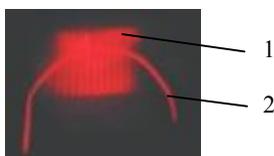


Рис. 4.2. Совмещение нихромовой нити 1 с нитью пирометра 2.

6. Ввести красный светофильтр 16 и, изменяя яркость нити пирометрической лампы поворотом кольца 8 реостата, довести ее до того, чтобы исчез средний участок (вершина дуги) нити пирометрической лампы на фоне изображения ленты. Следует помнить, что поворот кольца 8 реостата по часовой стрелке увеличивает накал нити, а против часовой стрелки уменьшает его. Для более точного фотометрирования рекомендуется кольцо 8 устанавливать в такое положение, при котором исчезает нить, подходя к нему повторно и поочередно от слишком малой и от слишком большой яркости. Нить кажется темной на относительно более светлом фоне при слишком малой ее яркости, и светлой - на относительно более темном фоне при слишком большой яркости.
7. Отсчитать и записать измеренную температуру $t_{я}^n$ по положению стрелки встроенного показывающего прибора (относительно шкалы выбранного предела измерения).

8. Операции, указанные в п.п. 4, 6 и 7 повторить 5-7 раз, подбирая заданные значения тока накала нихромовой ленты.
9. По окончании измерений выключить ток поворотом кольцевого реостата 20 против часовой стрелки и выключить рубильник лабораторной установки 23.
10. Измеренные при выполнении п. 6 и п. 7 в градусах Цельсия яркостные температуры $t_{я}^n$ нагреваемого тела перевести в абсолютные температуры: $T_{я}^n = t_{я}^n + 273$ (в кельвинах).
11. Для каждого значения $T_{я}^n$ по измеренным значениям тока и напряжения с помощью формулы (4.12) найти расчетные $T_{я}$.
12. Для каждой пары значений $T_{я}^n$ и $T_{я}$ по формуле (4.13) найти приборную погрешность пирометра, а затем ее среднее значение $\bar{\delta}$. Сравнить полученный результат с паспортными данными: для первого предела измерений ($800 \div 1200$ °С) $\sim \bar{\delta} = 1,5\%$, для второго ($1200 \div 1400$ °С) $\sim \bar{\delta} = 2,5\%$.

Контрольные вопросы.

1. Какова цель данной работы?
2. Что такое оптическая пирометрия?
3. На каких закономерностях основан контроль температуры тел по их тепловому излучению?
4. Какой пирометр используется в данной работе?
5. Как работает пирометр с исчезающей нитью?
6. Какая температура измеряется данным прибором?
7. Что такое яркостная температура? Она больше или меньше истинной температуры?
8. Как можно вычислить яркостную температуру?
9. Как определяется систематическая погрешность пирометра при контроле температуры?
10. По какому соотношению можно оценить приборную погрешность пирометра?